

# Estimasi *Centroid Moment Tensor* (CMT), Bidang Sesar, Durasi *Rupture*, dan Pemodelan Deformasi Vertikal Sumber Gempa Bumi sebagai Studi Potensi Bahaya Tsunami di Laut Selatan Jawa

Sayyidatul Khoiridah, Bagus Jaya Santosa  
Jurusan Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111  
E-mail: bjs@physics.its.ac.id

**Abstrak**—Penelitian ini telah dilakukan dengan tujuan untuk mengestimasi CMT gempa bumi yang terjadi di laut selatan Jawa, jenis sesar penyebab gempa bumi serta arah bidang sesarnya. Selain itu, penelitian ini juga dilakukan untuk mengestimasi  $T_{dur}$  dan hasil pemodelan deformasi vertikal sumber gempa bumi yang dapat berpotensi terjadi tsunami. Daerah penelitian dipilih di laut selatan Jawa. Hal ini karena Jawa merupakan daerah subduksi yang rawan terjadi gempa bumi dan tsunami. Untuk mengestimasi CMT digunakan *software* ISOLA\_GUI yang kemudian diidentifikasi bidang sesarnya dengan metode H-C. Sedangkan untuk mengestimasi  $T_{dur}$  digunakan *software* Joko Tingkir dan untuk pemodelan *vertical displacement* digunakan *software* Tsunami L-2008 dengan dua skenario yaitu data ISOLA\_GUI dan IRIS dengan menggunakan korelasi persamaan Wells and Coppersmith dan Hanks and Kanamori. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa bidang patahan terletak pada *nodal plane* yang memiliki nilai *dip* lebih besar. Jenis patahan di daerah subduksi ini adalah *normal fault* dan *reverse fault*. Berdasarkan hasil *vertical displacement* diketahui bahwa yang lebih mendekati kondisi geologi adalah skenario IRIS yang menunjukkan bahwa di laut selatan Jawa memiliki arah patahan cenderung ke Utara-Selatan yang searah dengan pergerakan lempeng antara Indo-Australia dan Eurasia. Untuk  $T_{dur}$  gempa Pangandaran yang berpotensi tsunami terjadi selama 144,82 s. Sedangkan gempa dengan magnitudo  $> 5,5$  SR yang terjadi pada periode 2009 sampai 2014 tidak berpotensi tsunami dengan  $T_{dur} \leq 78,04$  s.

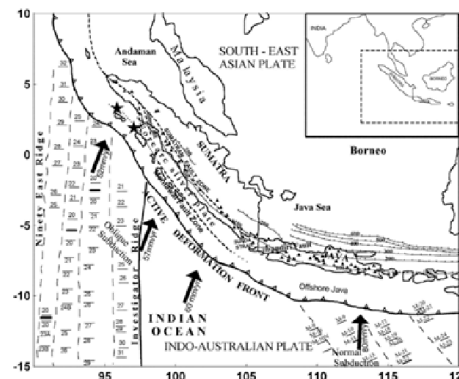
**Kata Kunci**—Bidang sesar, CMT,  $T_{dur}$ , tsunami, dan *vertical displacement*.

## I. PENDAHULUAN

INDONESIA berada pada wilayah jalur gempa aktif yang dapat menyebabkan terjadinya tsunami. Salah satu wilayah yang rawan terjadi tsunami adalah di laut selatan Jawa. Tektonik pulau Jawa terbentuk akibat dari peristiwa konvergen. Di kawasan konvergen ini lempeng tektonik Indo-Australia bergerak ke utara dengan kecepatan sekitar 70 mm/tahun menunjam ke bawah lempeng tektonik Eurasia yang relatif diam. Pertemuan kedua lempeng ini bersifat tumbukan. Akibat dari tumbukan kedua lempeng tektonik ini mengakibatkan terjadinya *trench* (palung laut), yang mana *trench* di pulau Jawa bersifat tegak lurus atau frontal. Lempeng Australia menunjam dengan kedalaman 100-200 km di bawah pulau Jawa dan 600 km di utara pulau Jawa. Konsekuensi tunjaman lempeng tersebut mengakibatkan kegempaan yang tinggi dan lebih dari 20 gunung api aktif di Zona ini [1].

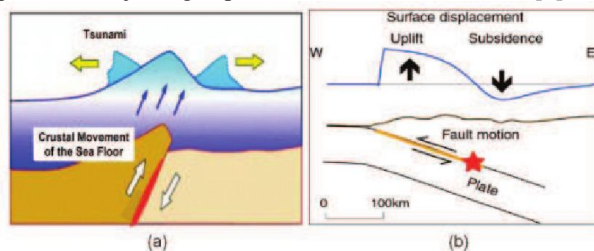
Berdasarkan hasil studi tomografi untuk daerah Busur Sunda dinyatakan bahwa lempeng litosfer di bawah Busur

Sunda bagian timur (Jawa-Flores) masih kontinu, tetapi ada indikasi bahwa lempeng litosfer mantel bagian atas menyempit terutama di bawah Jawa. Selain itu, ditemukan pula adanya *seismic gap* di selatan Jawa yang dicirikan adanya kekosongan pusat gempa bumi [2]. Hal tersebut mengindikasikan bahwa struktur lempeng yang menunjam di bawah Busur Sunda bagian timur lebih dalam dibandingkan dengan struktur lempeng yang menunjam di bawah Busur Sunda bagian barat. Sudut penunjaman di bawah Busur Sunda bagian timur sekitar  $60^\circ$  sedangkan di bawah Busur Sunda bagian barat sekitar  $40^\circ$ . Sehingga diperkirakan bahwa dalam skala waktu geologi, umur Busur Sunda bagian timur lebih tua sehingga lebih *rigid* dengan densitas lebih besar dibandingkan dengan umur Busur Sunda bagian barat [3].



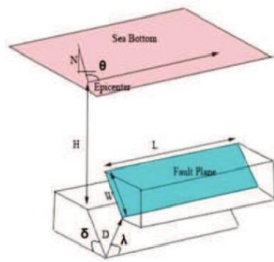
Gambar 1. Tektonik Indonesia bagian barat [4]

Beberapa sumber yang bisa menjadi pembangkit tsunami antara lain pergerakan deformasi dasar laut arah vertikal (sesar naik atau sesar turun) dan durasi *rupture*. Pergerakan vertikal lantai samudra naik (*uplift*) atau turun dengan cepat sebagai respon dari gempa bumi, maka akan menaikkan dan menurunkan air laut dalam skala besar. Karakteristik gempa tektonik yang dapat menyebabkan terjadinya tsunami, dapat dipenuhi oleh jenis gempa tektonik di zona subduksi [5].



Gambar 2. (a) Pergerakan deformasi kerak samudra di dasar laut diikuti pergerakan permukaan air laut (b) Bentuk pergerakan sumber tsunami di dasar laut mengikuti deformasi bidang sesar [6]

Adapun parameter sesar yang berhubungan dengan deformasi bawah permukaan ditunjukkan pada gambar 3.



**Keterangan:**

H = Kedalaman gempa

$\theta$  = Strike

$\delta$  = Dip

$\lambda$  = Slip

D = Dislokasi

W = Lebar sesar

L = Panjang sesar

Gambar 3. Parameter *fault break* [7]

Energi elastik yang tersimpan di dalam bumi dilepaskan ketika terjadi gempa bumi dan selanjutnya energi ini ditransfer menjadi gelombang tsunami. Dengan demikian, setelah terjadi gempa bumi kemudian apakah gempa bumi tersebut dapat memicu terjadinya tsunami atau tidak sangat bergantung pada besar energi. *Rupture* gempa bumi dipengaruhi oleh energi yang dilepaskan oleh sumber gempa bumi tersebut. Dalam teori seismologi, energi yang dilepaskan oleh sumber gempa bumi diilustrasikan sebagai momen seismik ( $M_0$ ) yang mengakibatkan terbentuknya luas dan *slip* dari *rupture* sebagaimana dinyatakan pada persamaan 1 [8].

$$M_0 = \mu AD \quad (1)$$

Dimana  $M_0$  adalah momen seismik (Nm),  $\mu$  adalah rigiditas ( $\text{N/m}^2$ ),  $A$  adalah luas bidang sesar ( $\text{m}^2$ ), dan  $D$  adalah *slip* (m) [9].

Untuk panjang dan lebar dari deformasi dapat ditentukan berdasarkan persamaan Wells and Coppersmith (1994). Untuk menghitung panjang, lebar, dan *fault* pada kasus *strike-slip fault* adalah sebagai berikut:

$$M_w = 5,16 + 1,12 * \log L \quad (2)$$

$$M_w = 3,80 + 2,59 * \log W \quad (3)$$

$$\log A = -3,42 + 0,90 * M_w \quad (4)$$

Sedangkan untuk jenis patahan naik (*reverse*) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$M_w = 5,00 + 1,22 * \log L \quad (5)$$

$$M_w = 4,37 + 1,95 * \log W \quad (6)$$

$$\log A = -3,99 + 0,98 * M_w \quad (7)$$

dan untuk jenis patahan turun (*normal*) digunakan persamaan sebagai berikut:

$$M_w = 4,86 + 1,32 * \log L \quad (8)$$

$$M_w = 4,04 + 2,11 * \log W \quad (9)$$

$$\log A = -3,49 + 0,91 * M_w \quad (10)$$

dimana  $L$  adalah *rupture length* (km),  $W$  adalah *rupture width* (km), dan  $A$  adalah *rupture area* ( $\text{km}^2$ ) [10].

Melihat kondisi geologis di laut selatan Jawa yang rawan terjadi tsunami, maka perlu dilakukan studi potensi bahaya tsunami sebagai upaya awal untuk melakukan mitigasi sehingga diharapkan dapat meminimalisir jumlah korban jiwa maupun harta benda ketika terjadi tsunami. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah perencanaan dan pemanfaatan sistem mitigasi bencana gempa bumi dan tsunami yang memiliki kinerja yang baik. Pada tugas akhir ini akan

menyajikan hasil-hasil penelitian tentang karakteristik mekanisme sumber gempa bumi CMT dan identifikasi bidang sesarnya, durasi *rupture* dari kejadian gempa bumi dan tsunami yang terjadi di laut selatan Jawa serta pemodelan deformasi vertikalnya. Penelitian gempa pada wilayah lautan dipilih sebagai upaya untuk memahami karakteristik gempa bumi yang dapat membangkitkan tsunami di daerah penelitian.

Manfaat dari dilakukan penelitian ini adalah dapat mengetahui parameter-parameter yang dapat menyebabkan terjadinya gempa bumi tsunami dan dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam mengambil keputusan mitigasi bencana gempa bumi dan tsunami.

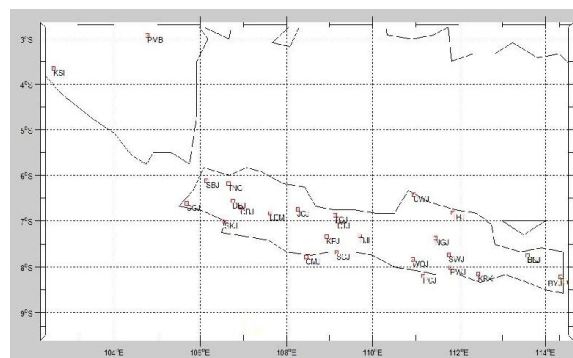
## II. METODOLOGI PENELITIAN

### A. Data Gempa Bumi dan Stasiun Penelitian

Data daerah penelitian pada tugas akhir ini difokuskan di laut selatan Jawa dengan batas  $105^\circ - 115^\circ \text{ BT}$  dan  $6^\circ - 12^\circ \text{ LS}$  yang terjadi pada tahun 2009 – 2014 dengan  $M_w > 5,5$  SR dan tsunami Pangandaran 17 Juli 2006 yang berupa data parameter gempa bumi dari GFZ-Postdam (GEOFON) dan IA (BMKG dan JISNET) yang digunakan untuk menentukan CMT dan durasi *rupture*. Selain itu, pada tugas akhir ini juga menggunakan data batimetri yang diperoleh dari situs GEBCO NOAA (*The General of Bathymetry Chart of The Oceans*) untuk pemodelan deformasi vertikal sumber gempa bumi. Pada penelitian ini digunakan stasiun yang berjarak  $0^\circ$  sampai  $10^\circ$  dari pusat gempa.

Tabel 1.  
Data gempa di laut selatan Jawa periode 2009 – 2014  
dan tsunami Pangandaran 2006

| Agency        | Origin Time            | $M_w$ | Depth (km) | Lokasi                                   |
|---------------|------------------------|-------|------------|--|
| IA            | 25/01/2014<br>05:14:21 | 6,1   | 88         | 104 km Barat Daya Kebumen-Jateng         |
| IA            | 13/06/2013<br>16:47:25 | 6,6   | 17         | 336 km Barat Daya Kab. Tasikmalaya-Jabar |
| IA            | 08/07/2013<br>02:13:43 | 5,6   | 67         | 112 km Tenggara Kab. Malang-Jatim        |
| IA            | 03/09/2012<br>18:23:04 | 6,2   | 14         | 301 km Barat Daya Banyuwangi-Jatim       |
| IA            | 04/06/2012<br>11:18:15 | 5,9   | 82         | 121 km Barat Daya Kab. Sukabumi-Jabar    |
| IA            | 14/04/2012<br>19:26:42 | 5,9   | 63         | 95 km Barat Daya Pandeglang-Banten       |
| IA            | 26/06/2010<br>09:50:45 | 5,9   | 92         | 118 km Barat Daya Tasikmalaya-Jabar      |
| IA            | 02/09/2009<br>07:55:02 | 7     | 62         | 142 km Barat Daya Tasikmalaya-Jabar      |
| Geofon dan IA | 17/07/2006<br>08:19:26 | 7,7   | 20         | 286 km selatan Bandung                   |



Gambar 4. Stasiun gempa yang digunakan untuk estimasi CMT dan durasi *rupture*

### B. Pengolahan Data

Pada pengolahan data CMT digunakan model bumi Jawa Haslinger-Santosa (H-S) [11, 12].

Tabel 2.  
Model Bumi Haslinger-Santosa (H-S) di Jawa

| Kedalaman (km) | Vp (km/s) | Vs (km/s) | Massa Jenis (g/cm <sup>3</sup> ) | Qp   | Qs  |
|----------------|-----------|-----------|----------------------------------|------|-----|
| 0,0            | 2,31      | 1,30      | 2,5                              | 300  | 150 |
| 1,0            | 4,27      | 2,40      | 2,9                              | 300  | 150 |
| 2,0            | 5,52      | 3,10      | 3,0                              | 300  | 150 |
| 5,0            | 6,23      | 3,50      | 3,3                              | 300  | 150 |
| 16,0           | 6,41      | 3,60      | 3,4                              | 300  | 150 |
| 33,0           | 6,70      | 4,70      | 3,4                              | 300  | 150 |
| 40,0           | 8,00      | 4,76      | 3,5                              | 600  | 500 |
| 100,0          | 8,00      | 4,57      | 3,3                              | 600  | 300 |
| 225,0          | 8,40      | 4,80      | 3,4                              | 600  | 300 |
| 325,0          | 8,60      | 4,91      | 3,5                              | 600  | 300 |
| 425,0          | 9,30      | 5,31      | 3,7                              | 1000 | 500 |

Untuk mengetahui bidang sesar yang dihasilkan dari *software* ISOLA\_GUI, maka digunakan metode H-C. Metode H-C membutuhkan *input* data berupa posisi hiposenter, posisi *centroid*, dan dua *nodal plane*. Kalau diperhatikan pada solusi CMT terdapat dua *nodal plane* (2 *strike*, 2 *dip*, dan 2 *rake*), dimana yang satu adalah *fault plane* dan yang lain adalah *auxiliary plane* [8].

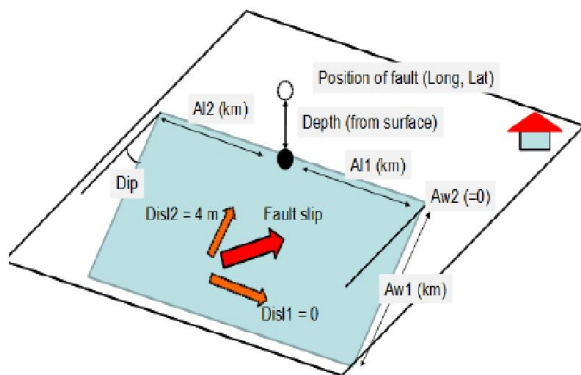
Pada penelitian ini juga digunakan *software* Joko Tingkir untuk mengestimasi  $T_{dur}$ . Pada penelitian ini digunakan gempa bumi regional sehingga untuk mengestimasi durasi *rupture* digunakan *filter* 5 – 20 Hz untuk mendapatkan seismogram rekaman kecepatan *high frequency* pada masing-masing stasiun [6]. Adapun persamaan matematis untuk menghitung  $T_{dur}$  dapat ditentukan sebagai berikut:

$$T_{dur} = (1 - w)T^{0,9} + wT^{0,2} \quad (11)$$

$$w = [(T^{0,2} + T^{0,5}) / 2 - 20] / 40s \quad (12)$$

dengan batasan  $T_{0,9} < T_{dur} < T_{0,2}$  [5].

Untuk mengestimasi *vertical displacement* digunakan *software* Tsunami L-2008. Adapun *Setting* parameter dalam *software* Tsunami L-2008 seperti terlihat pada gambar 5 [13].



Gambar 5. Setting Parameter dalam *software* Tsunami L-2008 [13]

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Estimasi CMT

Hasil dari momen tensor di laut selatan Jawa dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3.  
Momen tensor untuk gempa di laut selatan Jawa periode 2009 – 2014 dan tsunami Pangandaran 2006

| Event               | $M_{xx}=M_{33}$ | $M_{yy}=M_{11}$ | $M_{zz}=M_{22}$ | $M_{xy}=M_{31}$ | $M_{yz}=M_{32}$ | $M_{xz}=M_{12}$ | exp |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|
| 25/01/2014 05:14:21 | -1,020          | 0,668           | 0,352           | -0,286          | 0,054           | -0,587          | 18  |
| 13/06/2013 16:47:25 | -6,274          | 5,198           | 1,076           | 6,854           | 0,903           | -2,727          | 18  |
| 08/07/2013 02:13:43 | 2,018           | -2,325          | 0,307           | 1,203           | -0,325          | 1,041           | 17  |
| 03/09/2012 18:23:04 | -2,089          | 1,976           | 0,113           | 1,032           | 0,172           | -1,060          | 18  |
| 04/06/2012 11:18:15 | 6,136           | -7,240          | 1,103           | 5,008           | -2,287          | 0,651           | 17  |
| 14/04/2012 19:26:42 | 7,282           | -2,784          | -4,498          | 1,998           | -5,760          | 2,708           | 17  |
| 26/06/2010 09:50:45 | -6,247          | 1,546           | 4,701           | 8,069           | -0,324          | -3,406          | 17  |
| 02/09/2009 07:55:02 | 2,364           | -1,210          | -1,154          | 0,791           | -3,124          | -0,647          | 19  |
| 17/07/2006 08:19:26 | 1,649           | 0,033           | -1,682          | -4,211          | -2,434          | 0,872           | 20  |

Adapun nilai parameter *fault* untuk gempa bumi di laut selatan Jawa adalah sebagai berikut:

Tabel 4.  
Data parameter *fault* gempa bumi untuk jenis normal *fault* dari hasil ISOLA\_GUI

| Event      | Mw  | L (km) | W (km) | A (km <sup>2</sup> ) | D (m) |
|------------|-----|--------|--------|----------------------|-------|
| 26/06/2010 | 5,9 | 6,136  | 7,612  | 92,89                | 0,159 |
| 25/01/2014 | 6,1 | 8,697  | 9,469  | 135,52               | 0,175 |
| 03/09/2012 | 6,2 | 10,355 | 10,561 | 163,68               | 0,355 |
| 13/06/2013 | 6,6 | 20,806 | 16,341 | 348,34               | 0,638 |

Tabel 5.  
Data parameter *fault* gempa bumi untuk jenis normal *fault* dari hasil IRIS

| Event      | Mw  | L (km) | W (km) | A (km <sup>2</sup> ) | D (m) |
|------------|-----|--------|--------|----------------------|-------|
| 26/06/2010 | 5,9 | 6,136  | 7,612  | 92,89                | 0,128 |
| 25/01/2014 | 6,1 | 8,697  | 9,469  | 135,52               | 0,211 |
| 03/09/2012 | 6,3 | 12,328 | 11,778 | 197,69               | 0,397 |
| 13/06/2013 | 6,6 | 20,806 | 16,341 | 348,34               | 0,721 |

Tabel 6.  
Data parameter *fault* gempa bumi untuk jenis *reverse fault* dari hasil ISOLA\_GUI

| Event      | Mw  | L (km) | W (km) | A (km <sup>2</sup> ) | D (m) |
|------------|-----|--------|--------|----------------------|-------|
| 08/07/2013 | 5,6 | 3,103  | 4,273  | 31,47                | 0,116 |
| 04/06/2012 | 5,9 | 5,466  | 6,089  | 61,94                | 0,104 |
| 14/04/2012 | 5,9 | 5,466  | 6,089  | 61,94                | 0,197 |
| 02/09/2009 | 7,0 | 43,586 | 22,321 | 741,31               | 0,694 |
| 17/07/2006 | 7,7 | 163,35 | 51,014 | 3597,5               | 2,839 |

Tabel 7.  
Data parameter *fault* gempa bumi untuk jenis *reverse fault* dari hasil IRIS

| Event      | Mw  | L (km) | W (km) | A (km <sup>2</sup> ) | D (m) |
|------------|-----|--------|--------|----------------------|-------|
| 08/07/2013 | 5,7 | 3,748  | 4,809  | 39,446               | 0,170 |
| 04/06/2012 | 5,8 | 4,526  | 5,412  | 49,431               | 0,167 |
| 14/04/2012 | 5,9 | 5,466  | 6,089  | 61,944               | 0,165 |
| 02/09/2009 | 7,0 | 43,586 | 22,321 | 741,31               | 0,636 |
| 17/07/2006 | 7,7 | 163,35 | 51,014 | 3597,5               | 2,507 |

Pada saat terjadi gempa, ada dua bidang yang menjadi acuan dalam penentuan momen tensor yaitu *auxiliary plane* serta bidang patahan (*fault plane*) yang saling tegak lurus [14]. Adapun hasil dari Bidang sesar dan *auxiliary plane* di laut selatan Jawa periode 2009 – 2014 dan tsunami Pangandaran 2006 dapat dilihat pada tabel 8.



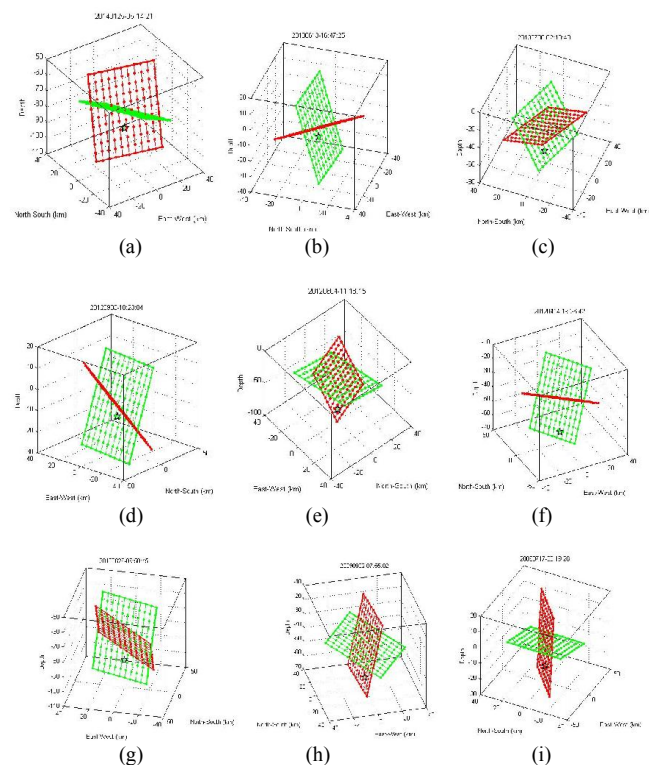
Tabel 8.

Bidang sesar dan *auxiliary plane* di laut selatan Jawa periode 2009-2014 dan tsunami Pangandaran 2006

| Event               | Plane I |     |      | Plane II |     |      |
|---------------------|---------|-----|------|----------|-----|------|
|                     | Strike  | Dip | Rake | Strike   | Dip | Rake |
| 25/01/2014:05:14:21 | 328     | 26  | -48  | 102      | 71  | -108 |
| 13/06/2013:16:47:25 | 273     | 69  | -107 | 135      | 27  | -52  |
| 08/07/2013:02:13:43 | 106     | 59  | 87   | 293      | 31  | 95   |
| 03/09/2012:18:23:04 | 279     | 57  | -108 | 130      | 37  | -64  |
| 04/06/2012:11:18:15 | 259     | 28  | 63   | 108      | 65  | 103  |
| 14/04/2012:19:26:42 | 154     | 66  | 98   | 316      | 25  | 73   |
| 26/06/2010:09:50:45 | 292     | 72  | -115 | 167      | 30  | -39  |
| 02/09/2009:07:55:02 | 37      | 19  | 129  | 177      | 75  | 78   |
| 17/07/2006:08:19:26 | 2       | 7   | 36   | 236      | 86  | 96   |

### B. Hasil Estimasi Bidang Sesar

Adapun hasil orientasi bidang patahan pada gempa bumi periode 2009 – 2014 di laut selatan Jawa dan gempa bumi tsunami di Pangandaran tahun 2006 dengan menggunakan metode H-C dapat dilihat pada gambar 6. Pada metode H-C dapat diketahui bahwa bidang patahan terletak pada salah satu *nodal plane* yang memiliki nilai *dip* lebih besar. *Nodal plane* yang memiliki nilai *dip* lebih besar ini digunakan sebagai *input* parameter pemodelan *vertikal displacement* dengan menggunakan skenario ISOLA\_GUI.



Gambar 6. Identifikasi bidang sesar di laut selatan Jawa pada periode 2009 sampai 2014 dan tsunami Pangandaran tahun 2006. Untuk kasus (a), (e), (h), dan (i) bidang sesar terletak pada bidang berwarna merah. Sedangkan untuk kasus (b), (c), (d), (f), dan (g) bidang sesar terletak pada bidang yang berwarna hijau.

Berdasarkan hasil identifikasi bidang sesar, dapat juga mengetahui jarak antara *centroid* dan hiposenter. Dimana jarak *centroid* lebih dangkal dari pada jarak hiposenter. Pengertian *centroid* dan hiposenter dari gempa bumi sangat berbeda. Hiposenter adalah titik origin (titik asal) dari gelombang

seismik yaitu saat terjadinya *crack* pada bidang sesar. Sedangkan *centroid* adalah lokasi pelepasan momen dominan dan merepresentasikan parameter-parameter gempa bumi secara menyeluruh, bukan hanya permulaan seperti hiposenter [8].

### C. Hasil Uji Perbandingan antara CMT ISOLA\_GUI dan IRIS

Tabel 9.

Data uji perbedaan CMT hasil ISOLA\_GUI dengan IRIS

| Agency    | Event               | Lat. (°) | Long. (°) | Mw  | Depth (km) | Nodal Plane I Strike | Nodal Plane I Dip | Nodal Plane I Rake | Nodal Plane II Strike | Nodal Plane II Dip | Nodal Plane II Rake | Slip (m) | Fault Type    |
|-----------|---------------------|----------|-----------|-----|------------|----------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|----------|---------------|
| ISOLA_GUI | 25/01/2014 05:14:21 | -8,15    | 109,24    | 6,1 | 88         | 328                  | 26                | -48                | 102                   | 71                 | -108                | 1        | Normal Fault  |
| IRIS      | 25/01/2014 05:14:21 | -8,37    | 109,28    | 6,1 | 85         | 290                  | 19                | -90                | 111                   | 71                 | -90                 | 1        | Normal Fault  |
| ISOLA_GUI | 13/06/2013 16:47:25 | -9,94    | 107,28    | 6,6 | 17         | 273                  | 69                | -107               | 135                   | 27                 | -52                 | 1        | Normal Fault  |
| IRIS      | 13/06/2013 16:47:25 | -10,15   | 107,37    | 6,6 | 12,6       | 118                  | 37                | -86                | 293                   | 53                 | -93                 | 1        | Normal Fault  |
| ISOLA_GUI | 08/07/2013 02:13:43 | -9,00    | 113,01    | 5,6 | 67         | 106                  | 59                | 87                 | 293                   | 31                 | 95                  | 1        | Reverse Fault |
| IRIS      | 08/07/2013 02:13:43 | -9,13    | 113,06    | 5,7 | 70,6       | 274                  | 27                | 70                 | 116                   | 65                 | 100                 | 1        | Reverse Fault |
| ISOLA_GUI | 03/09/2012 18:23:04 | -10,89   | 113,85    | 6,2 | 14         | 279                  | 57                | -108               | 130                   | 37                 | -64                 | 1        | Normal Fault  |
| IRIS      | 03/09/2012 18:23:04 | -10,96   | 113,910   | 6,3 | 17,2       | 119                  | 38                | -70                | 275                   | 54                 | -105                | 1        | Normal Fault  |
| ISOLA_GUI | 04/06/2012 11:18:15 | -7,82    | 106,26    | 5,9 | 82         | 259                  | 28                | 63                 | 108                   | 65                 | 103                 | 1        | Reverse Fault |
| IRIS      | 04/06/2012 11:18:15 | -8,40    | 106,35    | 5,8 | 65,2       | 267                  | 23                | 67                 | 111                   | 69                 | 100                 | 1        | Reverse Fault |
| ISOLA_GUI | 14/04/2012 19:26:42 | -7,00    | 105,65    | 5,9 | 63         | 154                  | 66                | 98                 | 328                   | 19                 | 101                 | 1        | Reverse Fault |
| IRIS      | 14/04/2012 19:26:42 | -6,81    | 105,45    | 5,9 | 62,7       | 328                  | 19                | 101                | 136                   | 72                 | 86                  | 1        | Reverse Fault |
| ISOLA_GUI | 26/06/2010 09:50:45 | -8,09    | 108,05    | 5,9 | 92         | 292                  | 72                | -115               | 167                   | 30                 | -39                 | 1        | Normal Fault  |
| IRIS      | 26/06/2010 09:50:45 | -8,01    | 108,05    | 5,9 | 88         | 181                  | 7                 | -10                | 281                   | 89                 | -97                 | 1        | Normal Fault  |
| ISOLA_GUI | 02/09/2009 07:55:02 | -8,00    | 107,30    | 7   | 82         | 37                   | 19                | 129                | 177                   | 75                 | 78                  | 1        | Reverse Fault |
| IRIS      | 02/09/2009 07:55:02 | -7,73    | 107,41    | 7   | 57,8       | 54                   | 46                | 117                | 198                   | 50                 | 65                  | 1        | Reverse Fault |
| ISOLA_GUI | 17/07/2006 08:19:26 | -9,30    | 107,20    | 7,7 | 20         | 2                    | 7                 | 36                 | 236                   | 86                 | 96                  | 1        | Reverse Fault |

Berdasarkan hasil uji perbedaan antara CMT ISOLA\_GUI dengan IRIS dapat diketahui bahwa keduanya memiliki jenis patahan yang sama yaitu *normal fault* dan *reverse fault*. Hal ini sesuai dengan kondisi tektonik geologi laut selatan Jawa yang berada pada jalur subduksi.

### D. Hasil Estimasi Durasi rupture ( $T_{dur}$ )

Tabel 10.

Hasil pengujian potensi tsunami menggunakan  $T_{dur}$  pada gempa bumi di laut selatan Jawa periode 2009 – 2014 dan tsunami Pangandaran 2006

| Origine Time        | Lat. (°) | Long. (°) | Mw  | Fault Type | $T_{dur}$ (s) | TP |
|---------------------|----------|-----------|-----|------------|---------------|----|
| 08/07/2013 02:13:43 | -9,00    | 113,01    | 5,6 | Reverse    | 49,57         | nT |
| 04/06/2012 11:18:15 | -7,82    | 106,26    | 5,9 | Reverse    | 53,49         | nT |
| 14/04/2012 19:26:42 | -7,00    | 105,65    | 5,9 | Reverse    | 39,67         | nT |
| 26/06/2010 09:50:45 | -8,09    | 108,05    | 5,9 | Normal     | 48,82         | nT |
| 25/01/2014 05:14:21 | -8,15    | 109,24    | 6,1 | Normal     | 52,20         | nT |
| 03/09/2012 18:23:04 | -10,89   | 113,85    | 6,2 | Normal     | 43,24         | nT |
| 13/06/2013 16:47:25 | -9,94    | 107,28    | 6,6 | Normal     | 64,49         | nT |
| 02/09/2009 07:55:02 | -8,00    | 107,30    | 7,0 | Reverse    | 78,04         | nT |
| 17/07/2006 08:19:26 | -9,30    | 107,20    | 7,7 | Reverse    | 144,82        | T  |

• TP: Tsunami Potential, nT: non-Tsunami, T: Tsunami

Berdasarkan hasil estimasi durasi *rupture* gempa bumi di laut selatan Jawa yang dilihatkan pada tabel 10 dapat diketahui bahwa gempa bumi yang berpotensi terjadi tsunami memiliki  $T_{dur}$  144,82 s. Pada gempa lokal, gempa bumi bisa dikatakan berpotensi tsunami apabila  $T_{dur} > 65$  s [6]. Sedangkan untuk gempa bumi yang terjadi pada 02/09/2009 pukul 07:55:02 di laut dengan jarak 142 km Barat Daya Tasikmalaya, Jawa Barat tidak berpotensi terjadi tsunami walaupun  $T_{dur} > 65$  s yaitu

78,038 s. Hal ini dikarenakan untuk bisa dikatakan terjadi tsunami apabila dua parameter terpenuhi yaitu ketinggian air maksimum di pantai lebih besar atau sama dengan 0,5 m dan jumlah terjangan (*run up*) ombak lebih dari satu kali [8]. Sedangkan pada gempa bumi 02/09/2009 berdasarkan hasil survei hanya memiliki *run up* 15 cm yang tercatat di sensor Tide Gauge yang dipasang di Pelabuhan Ratu [11]. Untuk gempa bumi signifikan dengan magnitudo  $> 5,5$  SR yang terjadi pada tahun 2014 sampai 2010 di laut selatan Jawa tidak berpotensi tsunami dan termasuk gempa bumi dirasakan dengan  $T_{dur} < 65$  s.

#### E. Hasil Estimasi Pemodelan Deformasi Vertikal Sumber Gempa Bumi

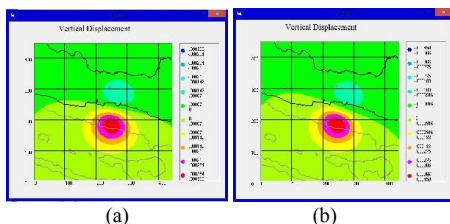
Pengolahan data menggunakan *software* Tsunami L-2008 menghasilkan *output* berupa nilai *vertical displacement* yang mana ditunjukkan pada tabel 11. Pada pemodelan *vertical displacement* ini digunakan dua skenario. Skenario pertama mengacu pada mekanisme sumber gempa bumi hasil dari ISOLA\_GUI dan skenario kedua mengacu pada mekanisme sumber gempa bumi hasil dari IRIS. *Input* parameter yang digunakan oleh kedua skenario untuk pemodelan deformasi vertikal sumber gempa bumi didasarkan pada perhitungan dengan menggunakan korelasi persamaan Wells and Coppersmith (1994) dan Hanks and Kanamori (1979).

Tabel 11.

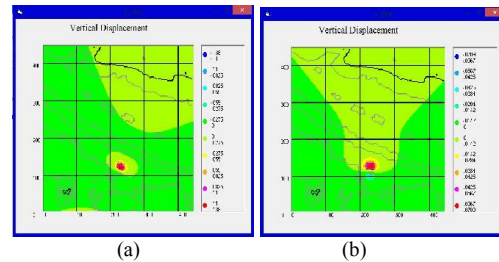
Hasil *vertical displacement* pada gempa bumi di laut selatan Jawa periode 2009 – 2014 dan tsunami Pangandaran 2006

| Event                  | <i>M<sub>w</sub></i><br>ISOLA | Depth<br>ISOLA<br>(km) | Vertical Displacement<br>ISOLA_GUI (m) |                       | <i>M<sub>w</sub></i><br>IRIS | Depth<br>IRIS<br>(km) | Vertical Displacement<br>IRIS (m) |                       | Fault<br>Type    |
|------------------------|-------------------------------|------------------------|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------|
|                        |                               |                        | Min                                    | Max                   |                              |                       | Min                               | Max                   |                  |
| 25/01/2014<br>05:14:21 | 6,1                           | 88                     | $-3,55 \times 10^{-4}$                 | $3,55 \times 10^{-4}$ | 6,1                          | 85                    | $-4,38 \times 10^{-4}$            | $4,58 \times 10^{-4}$ | Normal<br>fault  |
| 13/06/2013<br>16:47:25 | 6,6                           | 17                     | $-1,38 \times 10^{-1}$                 | $1,38 \times 10^{-1}$ | 6,6                          | 12,6                  | $-7,09 \times 10^{-2}$            | $7,09 \times 10^{-2}$ | Normal<br>fault  |
| 08/07/2013<br>02:13:43 | 5,6                           | 67                     | $-7,91 \times 10^{-5}$                 | $7,91 \times 10^{-5}$ | 5,7                          | 70,6                  | $-1,33 \times 10^{-4}$            | $1,33 \times 10^{-4}$ | Reverse<br>Fault |
| 03/09/2012<br>18:23:04 | 6,2                           | 14                     | $-2,71 \times 10^{-2}$                 | $2,71 \times 10^{-2}$ | 6,3                          | 17,2                  | $-2,86 \times 10^{-2}$            | $2,86 \times 10^{-2}$ | Normal<br>fault  |
| 04/06/2012<br>11:18:15 | 5,9                           | 82                     | $-1,11 \times 10^{-4}$                 | $1,11 \times 10^{-4}$ | 5,8                          | 65,2                  | $-1,94 \times 10^{-4}$            | $1,94 \times 10^{-4}$ | Reverse<br>Fault |
| 14/04/2012<br>19:26:42 | 5,9                           | 63                     | $-3,43 \times 10^{-4}$                 | $3,43 \times 10^{-4}$ | 5,9                          | 62,7                  | $-2,65 \times 10^{-4}$            | $2,65 \times 10^{-4}$ | Reverse<br>Fault |
| 26/06/2010<br>09:50:45 | 5,9                           | 92                     | $-1,69 \times 10^{-4}$                 | $1,69 \times 10^{-4}$ | 5,9                          | 88                    | $-9,99 \times 10^{-5}$            | $9,99 \times 10^{-5}$ | Normal<br>fault  |
| 02/09/2009<br>07:55:02 | 7,0                           | 62                     | $-2,38 \times 10^{-2}$                 | $2,38 \times 10^{-2}$ | 7,0                          | 57,8                  | $-3,31 \times 10^{-2}$            | $3,31 \times 10^{-2}$ | Reverse<br>Fault |
| 17/07/2006<br>08:19:26 | 7,7                           | 20                     | $-7,19 \times 10^{-1}$                 | $7,19 \times 10^{-1}$ | 7,7                          | 20                    | $-7,11 \times 10^{-1}$            | $7,11 \times 10^{-1}$ | Reverse<br>Fault |

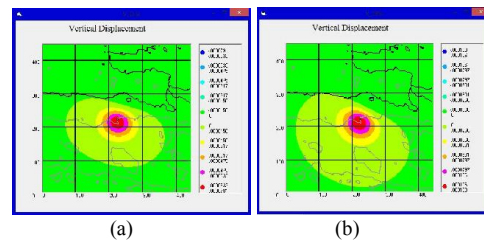
Berdasarkan hasil estimasi pemodelan *vertical displacement*, selain diketahui nilai *vertical displacement* juga dapat diketahui arah dari bidang patahan yang terjadi di daerah penelitian tersebut sehingga ketika terjadi gempa bumi dapat digunakan sebagai dasar mengambil keputusan untuk evakuasi pada daerah yang berpotensi terjadi tsunami.



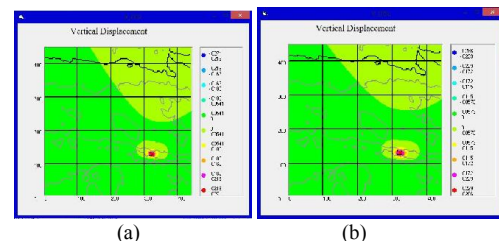
Gambar 7. *Vertikal displacement* berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 25/01/2014:15:14:21 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (*strike*: 102, *dip*: 71, dan *rake*: -108) (b) Skenario IRIS (*strike*: 111, *dip*: 71, dan *rake*: -90)



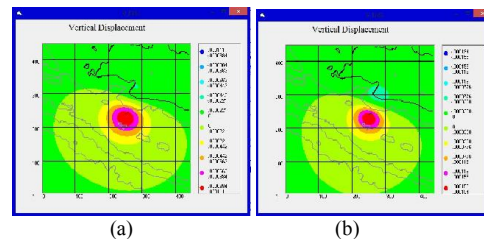
Gambar 8. *Vertikal displacement* berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 13/06/2013:16:47:25 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (*strike*: 273, *dip*: 69, dan *rake*: -107) (b) Skenario IRIS (*strike*: 293, *dip*: 53, dan *rake*: -93)



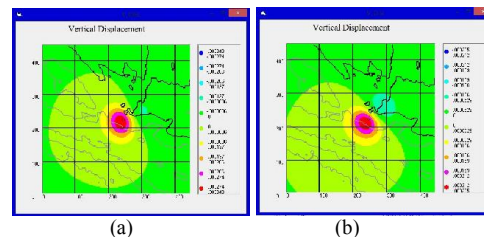
Gambar 9. *Vertikal displacement* berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 08/07/2013:02:13:43 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (*strike*: 106, *dip*: 59, dan *rake*: 87) (b) Skenario IRIS (*strike*: 116, *dip*: 65, dan *rake*: 100)



Gambar 10. *Vertikal displacement* berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 03/09/2012:18:23:04 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (*strike*: 279, *dip*: 57, dan *rake*: -108) (b) Skenario IRIS (*strike*: 275, *dip*: 54, dan *rake*: -105)

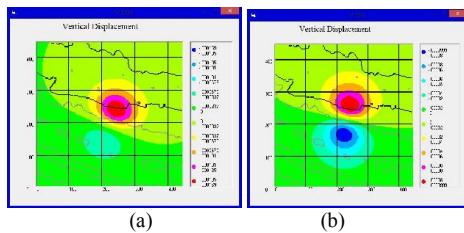


Gambar 11. *Vertikal displacement* berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 04/06/2012:11:18:15 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (*strike*: 108, *dip*: 65, dan *rake*: 103) (b) Skenario IRIS (*strike*: 111, *dip*: 69, dan *rake*: 100)

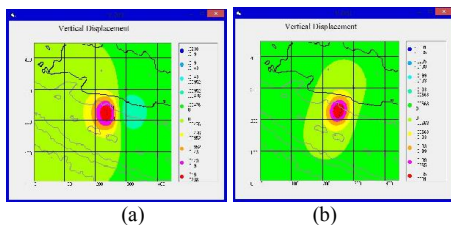


Gambar 12. *Vertikal displacement* berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 14/04/2012:19:26:42 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (*strike*: 154, *dip*: 66, dan *rake*: 98) (b) Skenario IRIS (*strike*: 136, *dip*: 72, dan *rake*: 86)

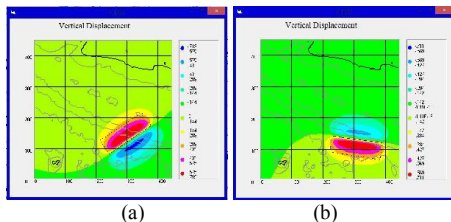




Gambar 13. Vertikal displacement berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 26/06/2010:09:50:45 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (strike: 292, dip: 72, dan rake: -115) (b) Skenario IRIS (strike: 281, dip: 89, dan rake: -97)



Gambar 14. Vertikal displacement berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 02/09/2009:07:55:02 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (strike: 177, dip: 75, dan rake: 78) (b) Skenario IRIS (strike: 198, dip: 50, dan rake: 65)



Gambar 15. Vertikal displacement berdasarkan 2 skenario penentuan mekanisme sumber gempa bumi 17/07/2006:08:19:26 UTC (a) Skenario ISOLA\_GUI (strike: 236, dip: 86, dan rake: 96) (b) Skenario IRIS (strike: 98, dip: 80, dan rake: 88)

Berdasarkan hasil pemodelan deformasi vertikal sumber gempa bumi dapat diketahui bahwa skenario yang lebih mendekati dengan tektonik geologi di laut selatan Jawa adalah skenario IRIS yang menunjukkan bahwa arah dari bidang patahan cenderung bergerak ke Utara-Selatan. Hal ini searah dengan pergerakan lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara menunjam terhadap lempeng tektonik Eurasia.

#### IV. KESIMPULAN

Jenis patahan yang terjadi di laut selatan Jawa adalah pola patahan turun dan patahan naik. Sedangkan dari pemodelan vertikal displacement diketahui bahwa skenario IRIS lebih mendekati tektonik geologi di laut selatan Jawa, yang mana dari pemodelan dengan skenario IRIS diketahui bahwa arah bidang patahan di laut selatan Jawa cenderung ke arah Utara-Selatan. Pada penelitian ini nilai minimum vertical displacement untuk skenario dengan ISOLA\_GUE berkisar antara  $-7,91 \times 10^{-5}$  m dengan  $M_w$  5,6 SR sampai  $-7,19 \times 10^{-1}$  m dengan  $M_w$  7,7 SR dan nilai maksimum vertical displacement berkisar antara  $7,91 \times 10^{-5}$  m dengan  $M_w$  5,6 SR sampai  $7,19 \times 10^{-1}$  m dengan  $M_w$  7,7 SR. Sedangkan pada skenario IRIS diperoleh nilai minimum vertical displacement berkisar antara  $-9,99 \times 10^{-5}$  m dengan  $M_w$  5,9 SR sampai -

$7,11 \times 10^{-1}$  m dengan  $M_w$  7,7 SR dan nilai maksimum vertical displacement berkisar antara  $9,99 \times 10^{-5}$  m dengan  $M_w$  5,9 SR sampai  $7,11 \times 10^{-1}$  m dengan  $M_w$  7,7 SR. Untuk durasi rupture pada tsunami Pangandaran yang terjadi pada 17 Juli 2006 berlangsung selama 144,82 s dan untuk gempa bumi signifikan yang terjadi di laut selatan Jawa pada periode 2009 sampai 2014 tidak berpotensi tsunami dan merupakan gempa bumi dirasakan yang memiliki  $T_{dur} \leq 78,04$  s.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U selaku dosen pembimbing dan semua pihak yang terlibat dalam penelitian tugas akhir ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rohadi, S. 2009. *Distribusi Spasial dan Temporal Seismotektonik Wilayah Subduksi Jawa, Megasains*. 1(4): 180-188.
- [2] Widiyantoro, S. dan Puspito, N.T. 1998. *Tomografi waktu tempuh gelombang S dan struktur 3-D zona penunjaman di bawah Busur Sunda*. Laporan Penelitian SPP/DPP-ITB, 24.
- [3] Widiyantoro, S. and Van D.H.R.D. 1996. *Structure and evolution of lithospheric slab beneath the Sunda arc, Indonesia*. Science, 271, 1566-1570.
- [4] Lasitha, S., Radhakrishna, M., and Sanu, T.D. 2006. *Seismically active deformation in the Sumatra – Java trench arc region*. Geodynamic Implication. Current Science, 90 (5), 690-696.
- [5] Rahmawan, S. H., Gunawan I, Musa A.M., dan Muhammad A. 2012. *Studi Potensial Bahaya Tsunami Di Selatan Jawa*. Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Program Studi Meteorologi, ITB.
- [6] Satake, K., and Tanioka, Y. 1999. *Source of Tsunami and Tsunamigenic Earthquake in Subduction Zone*. Pure and Applied Geophysics 154: 467-483.
- [7] Imamura, F., Yalciner, Ahmet C., Ozyurt, and Gulizar. 2006. *Tsunami Modelling Manual*. DCRC (Disaster Control Research Center), Tohoku University, Japan.
- [8] Madlazim, 2011. *Estimasi CMT, Bidang Sesar dan Durasi Rupture Gempabumi Di Sumatra serta Kemungkinan Penerapannya Untuk Sistem Peringatan Dini Tsunami*. Sidang terbuka promosi doktor, Geofisika, Fakultas matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITS Surabaya.
- [9] Hanks T.C and Kanamori H. 1979. *A moment magnitude scale*. J. Geophys. Res., 84, 2348-2350.
- [10] Wells D.L. and Coppersmith K.J. 1994. *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994.
- [11] Haslinger, F., Kissling, E., Ansorge, J., Hatzfeld, D., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Makropoulos, Kahle, H.G. and Peter, Y. 1999. *3D crustal structure from local earthquake tomography around the Gulf of Arta (Ionian region, NW Greece)*. Tectonophysics, 304:201-218.
- [12] Santosa, B.J. 2008. *Analyzing the seismogram of earthquake on Sumatra – Java Subduction plane at CHTO observation station*. Jurnal MIPA, 13:25-43.
- [13] Setyonegoro, W., Bambang S., Sulastris, Jimmi N., dan Pupung S. 2012. *Analisis Sumber Gempa Bumi Pada Segmen Mentawai (Studi Kasus: Gempa Bumi 25 Oktober 2010)*. Jurnal Meteorologi dan Geofisika Vol. 13 No. 2 tahun 2012: 139-148.
- [14] Steith, S. and Michael W. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Oxford : Blackwell Publishing Ltd.